

引用格式:Gu Songyan, Guo Yang, Dou Fangli, *et al.* Radiometric Calibration Technology of Microwave Atmospheric Sounders of FY-3 Satellites[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 141-154. [谷松岩, 郭杨, 窦芳丽, 等. 风云三号微波大气探测载荷辐射定标[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 141-154.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0141

## 风云三号微波大气探测载荷辐射定标

谷松岩, 郭 杨, 窦芳丽, 吴 琼, 卢乃锰

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:**风云三号气象卫星是我国第二代极轨业务气象卫星, 具有全球、全天候和多光谱探测能力, 装载有微波温度计和微波湿度计2台微波大气探测载荷, 自2008年首发星升空后, 风云三号微波大气探测载荷资料在防灾减灾和数值天气预报同化应用中发挥了积极作用。风云三号气象卫星微波载荷辐射定标是从原始观测计数值出发获取目标亮温的数据处理技术过程, 包括发射前定标、在轨星上定标、综合辐射定标和历史资料再定标4个技术环节。精确的辐射定标是星载被动微波辐射计遥感资料定量应用的基础。本文综述了风云三号气象卫星微波大气探测载荷综合辐射定标技术, 介绍了风云三号微波大气探测载荷综合辐射定标基本原理及技术现状, 展望了风云气象卫星微波大气探测载荷综合辐射定标技术未来发展。

**关键词:**风云三号气象卫星; 微波大气探测载荷; 综合辐射定标; 交叉定标; 外定标

**中图分类号:**P412.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)01-0141-14

### 1 引言

风云三号气象卫星是我国第二代极轨业务气象卫星, 具有全球、全天候和多光谱探测能力, 其上装载的被动微波辐射计根据应用特点分为微波成像仪和微波大气探测仪两类。微波大气探测仪则利用大气气体吸收特性, 获取大气物理参数。用于大气温湿度廓线探测的微波探测仪一般采用切轨扫描方式, 通过全光路定标系统提高载荷在轨辐射定标精度。

2008年我国第二代极轨气象卫星首发星风云三号A星的成功发射, 标志着我国民用遥感卫星被动微波遥感探测量化的开始。到目前为止, 风云三号气象卫星已完成两个批次(01/02批)4颗卫星(FY-3A/B/C/D)的发射和业务运行, 4颗卫星上都装载了微波大气探测载荷: 微波温度计(FY-3A/B

MWTS, FY-3C/D MWTS-II)和微波湿度计(FY-3A/B MWHs, FY-3C/D MWHs-II)。从2000年9月风云三号气象卫星工程批复立项, 到2008年5月27日风云三号首发星A星发射升空, 8 a间经历了地面真空定标试验需求论证、星上定标源国际比对、真空定标试验、在轨定标试验等, 建立了风云三号微波大气探测载荷在轨业务辐射定标系统。风云三号气象卫星微波大气探测载荷的在轨稳定业务运行, 为风云三号卫星微波资料的定量应用和数值天气预报同化应用, 以及在国民经济防灾减灾中发挥重要作用奠定了基础。本文综述风云三号气象卫星微波大气探测载荷辐射定标技术发展。

### 2 风云三号微波大气探测载荷简介

准确获取大气温度和湿度初始场是提高数值天气预报准确性的前提和必要条件, 星载微波大气

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-12-19

**基金项目:**国家重点研发计划重点专项“国产多系列遥感卫星历史资料再定标技术”(2018YFB0504900)、“微波载荷历史数据再定标共性技术”(2018YFB0504902), 国家自然科学基金面上项目“风云卫星毫米波大气湿度探测仪在轨月球相对定标”(41775020), 国家自然科学基金青年科学基金项目“风云卫星微波双氧吸收通道降雪反演方法研究”(42005105)。

**作者简介:**谷松岩(1963—), 女, 辽宁鞍山人, 研究员, 主要从事微波辐射定标及定量应用。E-mail: gusy@cmg.gov.cn

**通讯作者:**郭 杨(1984—), 女, 四川江油人, 高级工程师, 主要从事微波辐射定标及定量应用。E-mail: guoyang@cmg.gov.cn

探测系统可以提供客观的全球覆盖大气初始场结构,近半个多世纪以来欧美十分注重发展星载大气探测技术。中国对发展此类探测技术非常重视,早在20世纪70年代,曾庆存就系统地阐述了大气红外遥感的原理和方法,为发展风云卫星大气探测系统奠定了理论基础。20世纪80年代中国气象局国家卫星气象中心开始组织调研论证风云卫星星载大气垂直探测的技术原理和实施途径。在充分调研论证的基础上,提出了微波与红外探测相结合发展风云卫星大气垂直探测系统的技术框架,同时明确了发展中国干涉式红外大气垂直探测仪的应用需求。根据风云极轨卫星风云三号的科学需求和技术可行性分析的不断迭代,风云三号大气垂直探测系统经历了从无到有、从风云三号02批提前到01批等诸多不平凡的技术调整过程。根据国内载荷研制技术水平,系统性能设计指标逐步从美国20世纪70年代的极轨气象卫星星载大气垂直探测业务系统(TOVS)向90年代先进的极轨卫星星载大气垂直探测系统(ATOVs)靠近,最终形成风云三号星载大气探测系统(VAS)。风云三号首发星A星于2008年成功发射,其上装载的由微波温度计、微波湿度计和红外分光计组成的星载大气垂直探测系统,成为风云三号气象卫星最具特色的遥感探测系统。在风云三号02批,星载大气探测系统进一步发展升级为由二代微波温度计(FY-3C/D MWTS-II)、二代微波湿度计(FY-3C/D MWHS-II)和高光谱红外大气探测仪(HIRAS)组成的星载业务大气探测系统。

星载大气垂直探测系统接收地气系统的电磁辐射,电磁波在大气中传输时由于大气的吸收和散射作用会不断发生变化。大气会吸收一些特定频段的电磁辐射,形成许多吸收线或带,每个吸收带包含许多很窄的吸收线,在吸收线中心区吸收很强,而在吸收线翼区大气吸收相对较弱。以大气微波吸收光谱为例(图1),在50~60 GHz氧气吸收带中某个吸收线中心的吸收系数高达4 dB/km,而在远翼则只有0.01 dB/km。如果选用位于吸收线中心设置通道,气体的吸收特别强,来自下层的辐射几乎完全被上层的大气所吸收,卫星收到的辐射主要来自上层大气的贡献;相反如果选用位于吸收线翼区设置通道,遥感仪器得到的辐射就主要来自低层大气或地表。因此,可以设置一组最佳的、吸收特性不同的通道进行探测,实现对大气不同高度

层物理特性的星载遥感探测。图2简示了在50~60 GHz氧气吸收带附近设置一组13个通道探测大气温度的时,各通道辐射所代表的特征高度(权重函数峰值高度)分布情况,从通道1到通道13大气吸收系数各通道辐射所代表的特征高度逐渐升高,可以有效获取大气各高度层的辐射信息,根据这些辐射信息可以反演得到大气温度的垂直分布廓线。目前,用于大气温度探测的吸收带主要有4.3  $\mu\text{m}$ 和15  $\mu\text{m}$ 的二氧化碳红外吸收带,以及微波波段50~60 GHz和118 GHz的氧气吸收;常用的大气湿度探测波段有红外波段的6.3  $\mu\text{m}$ 和微波波段的183.31 GHz水汽吸收线。

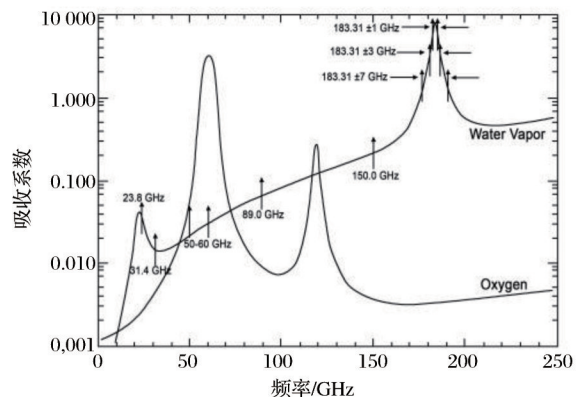


图1 大气微波吸收光谱

Fig.1 Atmospheric absorption spectrum

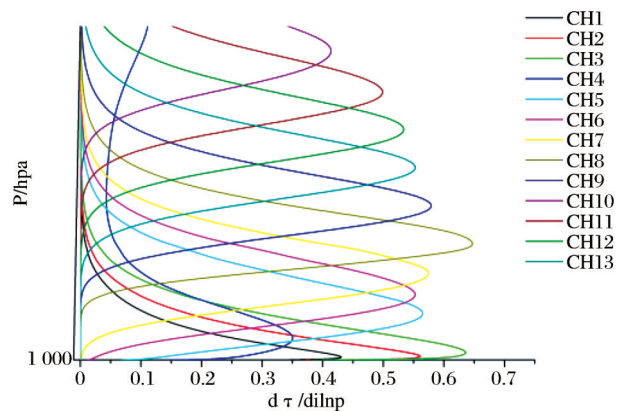


图2 风云三号微波温度计通道权重函数分布

Fig.2 Weighting functions for the MWTS-2

风云三号01批(FY-3A/B)星载大气垂直探测系统,由微波温度计、微波湿度计和红外分光计3台辐射计构成。其中微波温度计在50~60 GHz的氧气吸收频段设计有4个通道;微波湿度计与当时美国业务运行的ATOVs中的MHS和欧洲极轨业务卫星的AMSU-B相当,除了在183 GHz水汽吸收线附近设置了3个水汽主探测通道外,在150 GHz微波

窗区频段设置有双极化探测通道,成为当时国际上在轨业务运行的独具特色的探测载荷<sup>[1]</sup>。在风云三号01批实验批次的两颗卫星上,风云三号星载大气垂直探测系统载荷的基本设置和探测特性一直保持未变,其探测资料同化应用到我国自主研发的全球数值天气预报模式中,发挥了积极作用<sup>[2-3]</sup>。

在风云三号01批星载大气垂直探测系统成功试验应用的基础上,风云三号02批大气垂直探测系统设计之初,根据风云卫星发展的应用需求,在提升微波温度计探测能力和细化水汽探测通道的同时发展红外高光谱探测,这些设计思路也同时支撑了发展风云静止轨道大气探测系统的先期预研,尤其是为了支撑发展静止轨道微波大气探测增加了118 GHz氧气吸收线附近大气温度探测通道的设计,一方面可以提升风云三号卫星星载大气探测系统大气温度垂直探测能力,同时又可以为静止轨道发展亚毫米波大气探测提供真实的在轨探测数据<sup>[4-5]</sup>。风云三号02批业务批次的两颗卫星风云三号C/D星分别在2013年和2017年发射后,因其独具特色的通道设置,而受到欧美同行的广泛关注,尤其是118 GHz的探测资料有效改进了台风暖心结构探测,同时还为美国发展微波立方微小卫星星座构想提供了仿真数据。其中微波温度计50~60 GHz的通道设置与美国当代业务卫星SNPP上装载的大气探测载荷ATMS温度探测通道一致,微波湿度计183 GHz水汽探测通道设置与ATMS高频水汽探测通道一致。正在实施的风云三号03批规划有4颗卫星,其中上下午和晨昏三颗卫星上均设计装载与02批设计保持一致,性能大幅提高的星载微波大气垂直探测载荷。

规划中未来我国新一代极轨气象卫星风云五号,将通过发展微波高光谱技术进一步提升风云极轨气象卫星星载大气探测系统的探测能力,同时发展亚毫米波和太赫兹探测技术提高大气温室气体和冰云的探测能力。

### 3 风云三号微波大气探测载荷业务辐射定标

风云三号气象卫星微波载荷辐射定标是从原始观测计数值出发获取目标亮温的数据处理技术过程,包括发射前定标、在轨星上定标、综合辐射定标和历史资料再定标4个技术环节。精确的辐射定标是星载被动微波辐射计遥感资料定量应用的基

础。发射前定标是在地面真空罐中理想可控条件下,模拟仪器在轨工况,利用辐射参考基准揭示仪器辐射传递规律,建立定标模型,测定微波载荷遥感器辐射定标系统性能参数。在轨定标包括在轨星上定标和综合辐射定标。在轨星上定标是利用发射前建立的定标模型结合在轨定标动态参数完成在轨辐射定标,得到地气系统目标亮温。

综合辐射定标是针对风云三号微波载荷在轨业务定标生成的L1科学数据,通过多种定标检验验证技术手段优化辐射定标模型、更新定标系统参数的技术过程。既包含在轨定标辐射校准和检验验证,也包含了在轨替代定标技术。仪器在轨期间的辐射校准和检验验证常用技术包括在轨交叉定标、在轨场地定标和观测背景差(O-B)分析技术。如果仪器在轨期间辐射定标系统故障,这些辐射校准和检验验证技术同时也可作为风云三号极轨气象卫星微波载荷在轨替代定标技术手段;同时这些技术也是在轨辐射定标模型优化、参数更新和辐射基准传递的技术手段。在轨交叉定标是借助在轨具有高精度定标结果、光谱相近的同类遥感器相关通道观测结果,通过时空、仪器特性算子和仪器观测算子的匹配,消除仪器间来自时空、光谱、极化、入射角和观测方位角等非辐射定标系统差异,得到待定标载荷对应通道的参考辐射,统计分析参考辐射与待定标载荷相关通道观测计数值之间的模型关系,实现在轨交叉定标。对于微波吸收通道,利用在轨对地外稳定目标月球的观测数据还可以实现同谱段通道间的相对定标,未来还可尝试利用地外月球目标,开展微波大气探测载荷在轨绝对定标和辐射基准传递。在轨场地定标是借助一定条件下辐射特性稳定的场地作为媒介,在卫星过境时同步获取地表、大气特性参数,通过辐射传输模型并耦合仪器特性算子和仪器观测算子,正演得到传感器入瞳处的辐射量,进而建立遥感器在轨观测计数值和辐射量之间的对应关系,实现场地定标。对于利用微波吸收线实现大气探测的通道,因为受地表影响较小,可以将数值天气预报提供的大气状态参数作为背景场信息,利用正演微波辐射传输模型,并耦合相应的仪器算子,计算得到仪器入瞳处的微波辐射(Background),与卫星实际在轨观测辐射(Observation)匹配,实现星载微波辐射计定标系统的辐射校准和检验验证(O-B)<sup>[2]</sup>。微波辐射校正场外定标技术也是对在轨业务定标结果的检验验证的一



种技术手段。

历史资料再定标主要解决风云气象卫星微波载荷长时间序列全寿命期辐射定标不确定性的归一化,以及代季间辐射基准的传递及一致性处理,以便满足气候和气候变化研究对风云卫星微波载荷长序列历史资料的应用需求。

### 3.1 发射前地面真空定标技术

发射前地面真空定标是确保星载被动微波辐射计遥感信息定量应用的基础。欧美业务气象卫星上装载的同类载荷例如美国的 NOAA/AMSU、SNPP/ATMS、METOP/AMSU-A 和 METOP/MHS 等均在发射前通过地面真空定标试验确定微波辐射计系统的辐射响应规律,测定定标系统的静态参数,并在发射后,将地面测得的辐射响应规律传递应用到星上辐射定标系统。

中国在 20 世纪 80 年代就开始了微波辐射计定标技术研究<sup>[7-8]</sup>。风云三号微波大气探测载荷发射前地面真空定标采用两点整体定标方案,这种技术方案由美国学者哈迪<sup>[9]</sup>首先提出,从哈迪整体定标原型出发,我国学者根据风云三号的技术需求提出了改进方案,中国航天科技集团八院和中国科学院空间科学中心经过多次反复摸底试验,形成风云三号大气探测载荷地面真空定标方案<sup>[10-12]</sup>,中国航天工业总公司 203 所与中国科学院低温中心联合研制出高/低温可变动定标源<sup>[13]</sup>。在风云三号研制之初,国际上拥有一流微波辐射计地面定标校准设施的单位主要有英国的卢瑟福实验室和俄罗斯的全俄物理和无线电技术测量科学研究院下属的全俄微波遥感和微波天线计量实验室。美国 NIST 也在微波亮温传递标准方面开展了相应的研究工作。但当时国际上尚未建立微波辐射亮温的国际计量标准,在关键技术问题如黑体发射率的测量方法上也还没有建立统一的国际标准。在高精度定标设备研制方面,俄罗斯研制的 52.5~78.3 GHz 的黑体定标源采用空间法测量发射率值可达 0.995 以上,测量不确定度可达到 0.002。欧美国家中研制的定标源,尤其是技术含量很高的变温定标源,水平最先进的是原英国气象局遥感仪器分部,该部门先后为美国 NASA 的 AMSU-B 和巴西的 HSB 等微波辐射计提供变温定标源用于英国气象局辐射计校准研究室进行地面定标试验。

中国在“十五”期间,微波辐射计作为卫星全天候的对地观测仪器逐渐开始进入研制阶段,但微波

辐射计定标技术的研究开展相对滞后,并且与俄罗斯、欧美等发达国家相比研究水平存在一定差距,首次在神州 4 号实验飞船上(2002 年 12 月发射)装载的多模态微波遥感器突破了我国星载微波辐射计的设计和研制,但由于定标问题没有得到解决,影响了在轨数据的定量应用。因此,中国在“FY-3A”气象卫星微波辐射计定标问题上给予了极大的重视,微波辐射计的定标校准曾被列为“FY-3A”气象卫星迫切需要解决的 11 项关键技术之一。并在地面定标试验之前通过国际比对,校准了地面定标源。风云三号气象卫星微波载荷真空定标试验,经过 10 多年的不断探索、关键技术攻关和技术积累,逐步形成具有风云特色的发射前真空定标技术体系,为国产卫星其他系列微波载荷发射前真空定标试验方案的制定提供了示范。

风云三号气象卫星微波载荷发射前真空定标试验的主要目的是全面测量微波辐射计的系统响应特性,建立真空环境下各种参数对于辐射计输出影响的量化关系。风云三号微波大气探测载荷(微波湿度计/微波温度计)发射前真空定标试验为全系统整体定标试验;风云三号微波成像仪受天线尺寸限制,无法整体放入真空罐,发射前真空定标试验为馈源口面定标。

风云三号微波大气探测载荷真空定标试验在上海航天科技集团 509 所经过改造的 KM2 真空罐内进行,真空罐直径 2 m,真空度可以达到  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa 到  $1.5 \times 10^{-3}$  Pa。国外与风云三号微波大气探测载荷同类的 AMSU 和 ATMS 等仪器的地面真空定标试验中,所用真空罐均大于 2 m。

以风云三号 A 星微波湿度计为例,在地面真空试验中为模拟风云三号微波大气探测载荷在轨运行仪器温度的变化,真空试验过程中通过温控系统,保持微波湿度计底板温度在  $0^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内分别稳定在  $0^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  和  $30^{\circ}\text{C}$ ;相应的接收机中频温度分别为  $-3.1^{\circ}\text{C}$ 、 $8.3^{\circ}\text{C}$ 、 $17.6^{\circ}\text{C}$  和  $27.1^{\circ}\text{C}$ ;用变温源来模拟地气系统的温度变化,变温源位置固定在仪器天底点,温度变化范围在 80~330 K 内以 15 K 为间隔设置 17 个测温点,变温源温度控制稳定性优于  $\pm 0.1$  K/10min;冷定标源使用液氮系统制冷,位置固定在仪器冷空观测点( $+72.9^{\circ}$ ),稳定温控在 80~100 K 范围内某一个温度值,冷源温度控制稳定性优于  $\pm 0.1$  K/10 min;热定标源采用微波湿度计/微波温度计内部黑体。真空试验过程中,3

个源均采用铂电阻测温,测温精度优于 0.1 K。地面定标试验过程中接收机温度和变温源温度的配置见图 3,其中红色标注的温度为与冷源(95 K)和热

源(288 K)温度一致的变温源温度。通过地面真空试验可以建立风云三号微波大气探测载荷在轨业务辐射定标模型,确定系统静态参数。

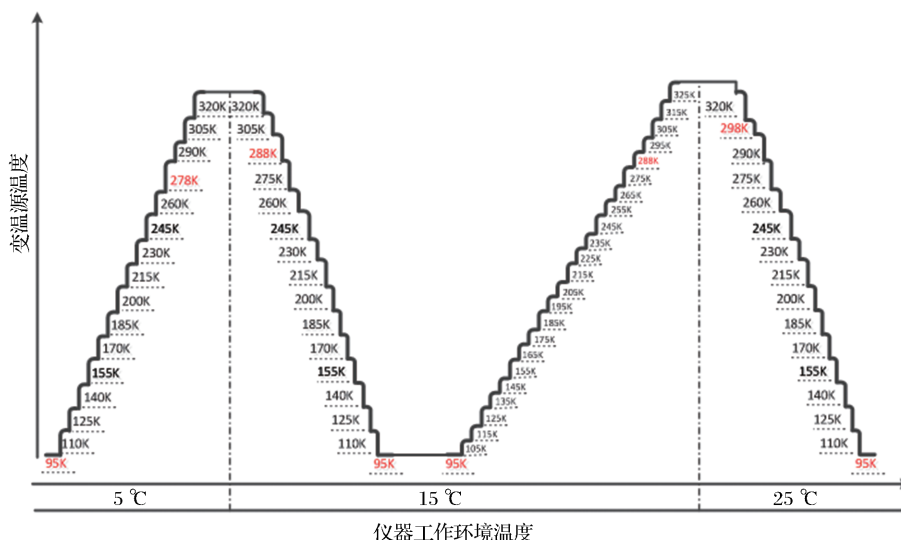


图 3 地面真空定标试验中变温源和仪器温度的相互配置示意图

Fig.3 Schematic of temperature of earth target and instrument in thermal vacuum calibration test

风云三号微波探测仪地面真空试验的不确定性主要来自 3 个方面:冷/热定标源辐射的不确定性;接收机非线性特性引起的定标不确定性和天线特性引起的定标不确定性。其中接收机特性引起的定标误差包括系统非线性、系统随机噪声、系统增益波动、频率响应函数变化、天馈系统和源之间的匹配等;天线特性引起的定标误差包括旁瓣影响、交叉极化和冷空溢出等。定标源的不确定性主要包括源的发射率,定标源温度特性,定标源罩的耦合损耗、反射的本振泄漏和接收机逆向辐射等引起的不确定性。定标源温度特性引起的不确定性,主要包括定标源温度梯度、定标源温度稳定性和定标源温度测量的不确定性等 3 个方面。风云三号微波大气探测载荷天线主波束效率大于 96%,真空试验数据处理过程中经非线性订正后,以微波湿度计为例,最大定标偏差约为 0.37 K,相当于接收机特性引起的定标误差和天线特性引起的误差两项的综合结果。对微波湿度计而言,真空定标试验不确定性最大约为 1.05 K<sup>[14-15]</sup>。

风云三号微波载荷地面真空试验很好地刻画出辐射计系统的辐射响应特性,为发射后在轨的业务辐射定标奠定了基础。在轨辐射定标业务应用中,逐步认识到星载微波辐射系统除了具有非线性辐射响应特性外,系统的辐射响应还具有角度依赖性,同时辐射计系统增益也制约着辐射计的系统响

应特性。而在 2 m 真空罐的狭小空间中,微波辐射的近场效应、源之间的相互影响、以及源温控系统等诸多因素都增加了地面真空试验的不确定性。

在过去 10 多年间风云三号微波大气探测载荷真空定标试验,在风云三号 C 星微波湿度计地面真空试验中尝试了微波辐射计辐射特性随扫描角变化的试验测量;在风云三号 D 星微波大气探测载荷地面真空试验中增加了辐射计在不同增益状态下辐射响应非线性特性参数测量;在风云三号 E 星微波湿度计地面真空试验中增加了辐射参考源,进一步精细刻画冷源和变温源的辐射不确定性。风云三号微波大气探测载荷真空定标试验模型得到不断改进和完善。未来风云三号微波大气探测载荷真空定标试验需要在更大的真空罐中进行,加大冷源与变温源之间距离以减小二者之间的相互耦合作用,采取更加有效的技术手段规避冷源对变温源的辐射干扰;同时考虑尝试增加氮屏,加强对辐射计系统低端辐射响应的测量。

### 3.2 在轨辐射定标技术

在轨业务辐射定标包括准实时在轨星上定标、近线综合辐射定标和在线的仪器状态监测等技术环节。在轨星上定标主要是将发射前地面真空定标试验得到的微波辐射计辐射响应模型和静态参数结合在轨实测的动态定标基础数据,将辐射观测计数值转换为地气系统目标微波辐射量。风云三

号气象卫星三台微波辐射计在轨星上业务辐射定标均采用以星上黑体和冷空为参考的两点周期定标。微波大气探测载荷(温度计/湿度计)以切轨扫描方式在一个扫描周期内以完全相同的方式分别获取冷空、热源和对地观测数据,同时依靠埋嵌在黑体内部的铂电阻测量热源温度,获取在轨动态辐射定标基础数据。微波成像仪则以圆锥扫描方式完成周期性观测,通过冷/热反射镜将冷空和热源的微波辐射反射到主天线,再经主天线反射进入馈源;但来自地气系统的微波辐射则直接经主天线反射进入馈源,这种观测体制不同于欧美同类载荷(例如GMI等)独具特色,其中热源的辐射处理是微波成像仪在轨星上业务辐射定标的关键技术。

风云三号微波大气探测载荷星上定标模型根据载荷在轨性能,业务上发展了3类在轨星上定标模型,包括非线性辐射定标模型、线性定标加非线性修正模型和高阶非线性定标模型。其中风云三号A星微波湿度计采用的线性定标加非线性修正模型与美国SNPP/ATMS的在轨定标模型一致<sup>[16]</sup>。风云三号B/C/D星的微波湿度计则采用了与AMSU一致的非线性辐射定标模型<sup>[17-18]</sup>。而风云三号C星的微波温度计则根据载荷在轨工况特点,利用高阶非线性定标模型有效抑制了系统定标的不确定性<sup>[19]</sup>。除根据风云三号微波载荷具体实际需求不断发展定标模型外,在轨业务定标系统静态参数的不断优化更新,以及定标系统动态参数指控方案的不断完善也是保证在轨业务定标精度的重要技术手段。

### 3.2.1 在轨星上定标技术

风云三号微波大气探测载荷在轨正常工作模式下偏置抛物面天线在扫描机构驱动下,垂直于飞行轨迹连续变速圆周扫描,获取到的微波辐射被主天线反射到波纹喇叭馈源,经准光学系统极化分离和分频得到以计数值形式表示的各通道观测值。在轨以宇宙背景和内部黑体为辐射参考,完成两点周期定标。

风云三号微波大气探测载荷在轨星上定标基础数据包括星上内部热源黑体温度PRT测量数据、冷空观测计数值、热源黑体观测计数值和仪器工作温度等。理想条件下这些动态定标基础数据在扫描周期内和扫描周期间应该稳定一致,受仪器性能和工作环境变化影响,定标基础数据有时会发生跳变,失去代表性,影响定标精度,因此首先需要在计

算定标系数之前对定标基础数据进行质量分析,完成定标基础数据扫描线上和扫描线间的质量检验和质量控制,生成可用于计算稳定定标系数的在轨星上定标基础数据。在轨星上定标技术流程见图4。

以风云三号微波湿度计为例,在轨星上定标01批通过建立目标亮温二次非线性订正模型实现在轨辐射定标;02批则直接建立与系统非线性因子耦合的辐射定标模型。2种模型在轨辐射定标应用都实现了系统非线性偏差最小的效果<sup>[16]</sup>。02批微波湿度计在轨辐射定标处理后<sup>[20]</sup>,得到各通道逐像元目标亮温,图5是FY-3C/MWHS-II15个通道全球亮温影像镶嵌图。

### 3.2.2 综合辐射定标

综合辐射定标是风云三号星载微波大气探测载荷在轨长期业务定标过程中,不断优化定标模型,更新定标系统静态参数,构建定标动态参数指控模型并不断优化模型及参数的复杂技术过程。风云三号微波大气探测载荷综合辐射定标技术涵盖了交叉定标、外场定标和观测背景差辐射校正等技术。

#### (1)交叉定标技术

星载微波大气探测以在轨交叉定标研究可以追溯到1999年,当时Christy等<sup>[21]</sup>为了利用美国NOAA系列卫星上装载的微波探测器(MSU: Microwave Sounding Unit)资料建立长时间全球温度变化资料序列,需要将多颗卫星的资料融合应用,直接将多颗NOAA卫星的MSU资料放在一起应用,发现不同卫星定标后的亮温数据间有系统偏差,后来Christy等<sup>[21]</sup>在多源MSU资料的融合应用方面开展了深入研究,2000年完成了MSU长时间序列数据集,2003年又将AMSU资料引入数据集;之后Mears等于2003年开始对数据集进行了再分析;2004年Grody等<sup>[22]</sup>明确提出用于气候研究的多星MSU数据的辐射定标;2006年Zou等<sup>[23]</sup>发展了Cao和Weinreb等<sup>[24]</sup>于2004年在建立长时间多源红外遥感数据集时提出的SNO(Simultaneous Nadir Overpasses)技术,完成了长时间序列星载多源微波探测数据融合的交叉辐射定标算法原理,实现了多微波遥感器辐射基准的交叉传递和数据融合。SNO技术是利用相同时刻、星下点观测相同目标的多源微波探测资料,以某一选定卫星的载荷为标准,完成多星辐射定标系统基准的交叉传递,实现



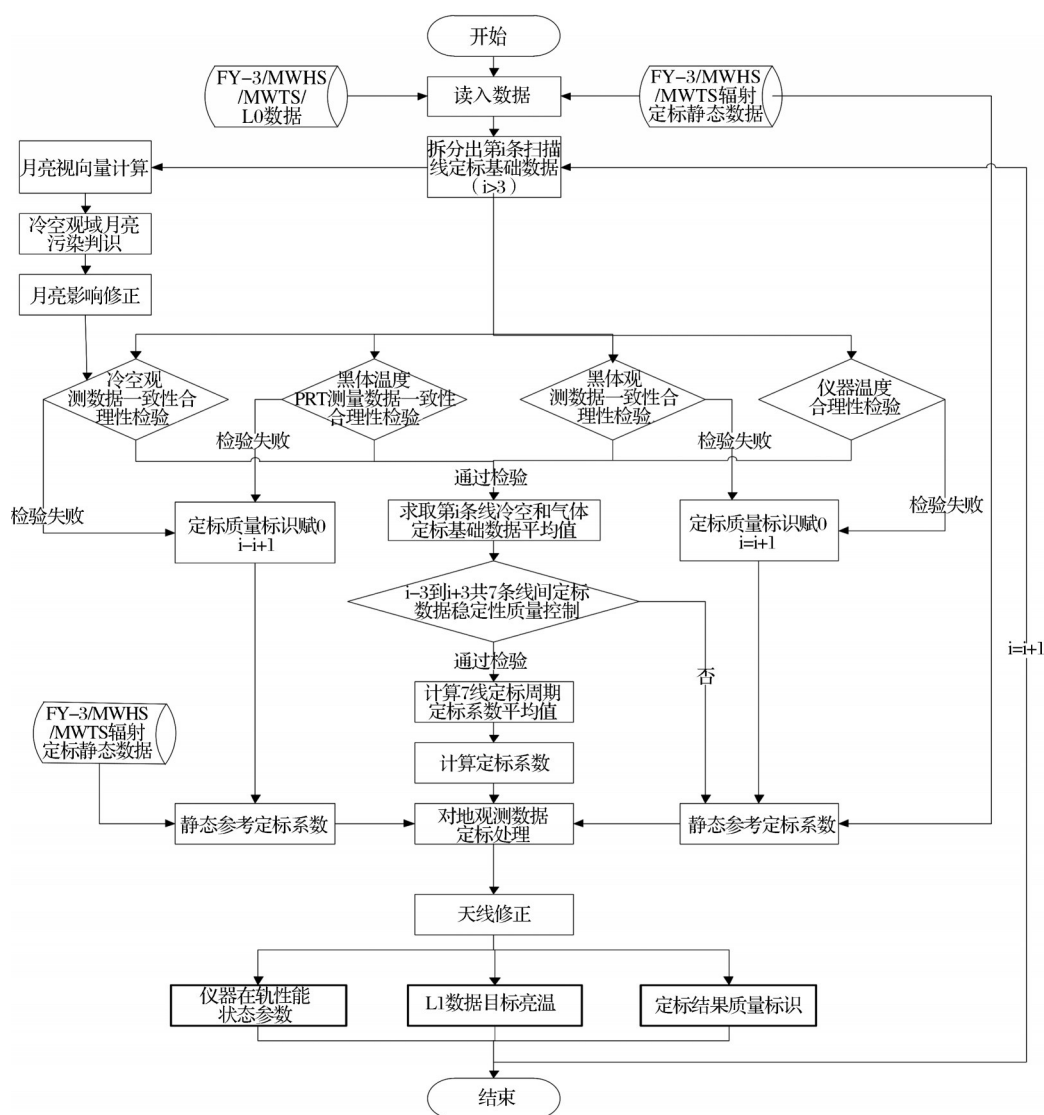


图 4 风云三号微波大气探测载荷在轨定标技术流程

Fig.4 The radiometric calibration flow chart for FengYun-3 microwave sounder

辐射的归一化。2008年Yan和Weng<sup>[25]</sup>提出了SCO (Simultaneous Conical Overpassing) 技术, 完成了SSMIS与SSM/I间的交叉定标, 并深入分析了造成两个载荷天线亮温偏差的仪器非线性特性, 非线性参数精校准后改进了SSMIS在轨定标, 地表微波发射率反演结果的偏差降低到0.003, 为提高SSMIS地表参数反演精度奠定了基础。

风云三号星载微波大气探测载荷在轨辐射交叉定标中数据匹配方法是瞬时星下点匹配(SNO), 匹配过程中除时空一致性约束外, 还需要考虑仪器性能参数(光谱、光谱响应和极化特性等)和仪器观测算子(观测角、观测方位角和扫描方式等)的相互匹配, 匹配过程中大气状况的稳定性至关重要, 一般应尽量减小匹配数据间的时间差, 同时选择匹配数据覆盖时段内大气状态稳定、观域足够均匀的样

本。尽量抑制SNO匹配数据辐射差异中非仪器定标系统的差异因子。根据星载微波辐射计交叉定标方法原理<sup>[26]</sup>, 风云三号气象卫星微波大气探测载荷交叉定标技术流程见图6。风云三号气象卫星首发星FY-3A发射升空后, 开展了交叉定标工作, 大气探测载荷微波温/湿度计分别与美国和欧洲业务卫星上装载的同类载荷进行了交叉比对<sup>[16-18]</sup>, 同时还利用交叉定标技术完成了冷空辐射偏差修正<sup>[27]</sup>; 载荷辐射资料的扫描角偏差订正<sup>[28]</sup>等定标系统静态参数的更新。通过交叉定标使不同载荷的辐射基准得到传递和统一, 为资料的融合和同化应用奠定了基础。气象卫星星载微波辐射计交叉定标技术为载荷辐射定标校验、多载荷间辐射传递、在轨替代定标和定标系统静态参数精校准提供了技术途径。

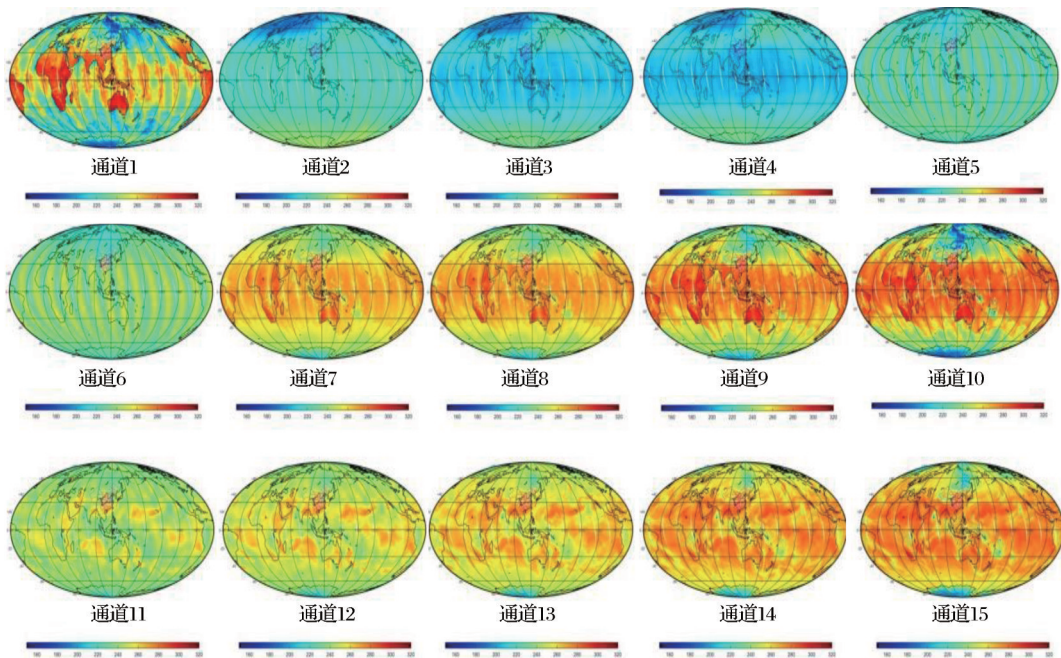


图5 FY-3C/MWHS-II通道全球亮温镶嵌图(2017年12月3日)

Fig.5 The observed brightness temperatures of FY-3C/MWHS-II for all channel (2017-12-3)

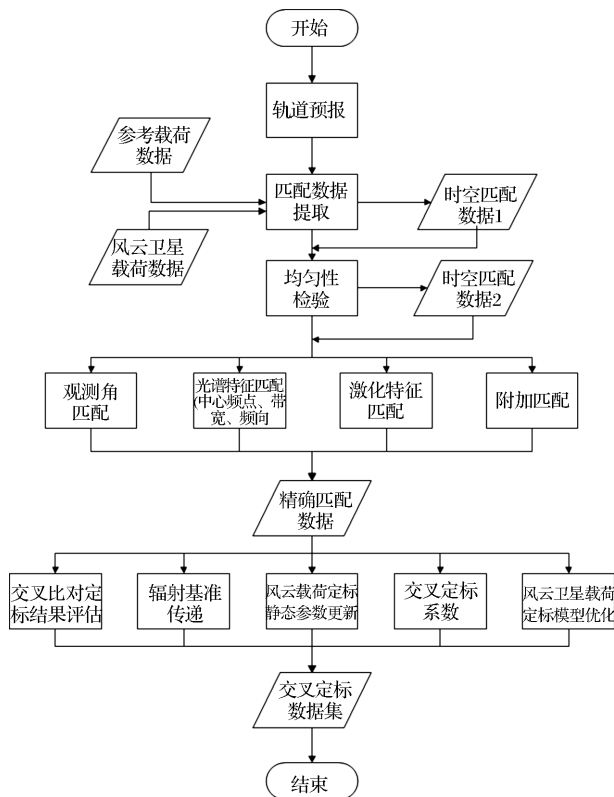


图6 交叉定标技术流程

Fig.6 The flow chart for inter-satellite calibration

## (2)外场定标技术

我国光学外场定标技术起步较早,中国遥感卫星辐射校正场技术系统经过发展已实现自动业务化运行。在可见光波段,敦煌是国内比较理想的定

标场,反射率常年稳定在24%附近,外场定标精度可以达到5%<sup>[29-30]</sup>。在微波波段不存在类似可见光波段敦煌这样的稳定目标,但一定条件下稳定的地球目标也为星载微波辐射计外定标提供了客观的辐射参考。根据国防科工局民用航天预研微波辐射校正场预研项目研究成果,利用多年全球遥感资料普查的技术手段可以甄别出微波条件稳定目标,微波波段全球相对稳定的地球目标包括亚马逊热带雨林,我国境内云南地区热带雨林也是较为稳定的目标。气象常规资料分析表明,云南普洱地区热带雨林在干季30 d亮温变化不超过0.4 K;亮温空间差异不超过0.15 K,可作为国产卫星星载微波辐射计在轨辐射校正场。星载微波辐射计在轨运行期间以微波辐射性能相对稳定的辐射校正场为参考,通过外场试验精确获取地气系统地球物理参数,借助微波辐射传输模型,并耦合载荷观测模型,计算得到载荷入瞳处微波辐射,与载荷在轨实际观测结果的对比分析可以校验实际观测数据的有效性,并进行辐射校正<sup>[12,31-32]</sup>。

风云三号气象卫星装载的3台微波辐射计在轨业务运行期间均组织实施了外场辐射校正试验(6次),检验验证载荷定标系统在轨辐射定标的有效性及精度。风云三号微波大气探测载荷(微波温度计和微波湿度计)还完成了发射前航空校飞试验,验证载荷工作原理。图7是风云三号气象卫星微波



大气探测载荷在轨外场定标技术框架。在风云三号地面系统工程建设和国家科研计划支撑下,风云三号气象卫星历经 12 a 的实践,逐步形成了星载微波辐射计航空校飞辐射检验验证系统,以及微波辐射外场校验验证系统。未来风云三号气象微波载荷辐射校正场技术将向业务化自动观测和精细化辐射传输模型两个方向发展。

普洱热带雨林作为星载微波辐射计辐射校正试验场(22.70°N、101.02°W),其热力结构具有明显的日变化特征,在外定标场区中心雨林热力梯度观

测结果表明从夜间到凌晨大气混合层开始抬升前,雨林整层热力结构均匀,其中 04:48~07:12 期间,雨林整层温度非常均匀一致;日出后,太阳加热雨林,雨林热力结构发生变化,各特征层间热力梯度加大,14:24 前后温度梯度达到最大 5℃。根据雨林热力结构,微波外定标应选择稳定热带雨林热力结构均匀的凌晨 4:00~7:00 时段。气象常规观测资料分析结果表明普洱每年干季 11 月到来年的 3 月晴天日数较多,其中 3 月份晴空日数最多,是热带雨林适合实施微波外定标的季节。

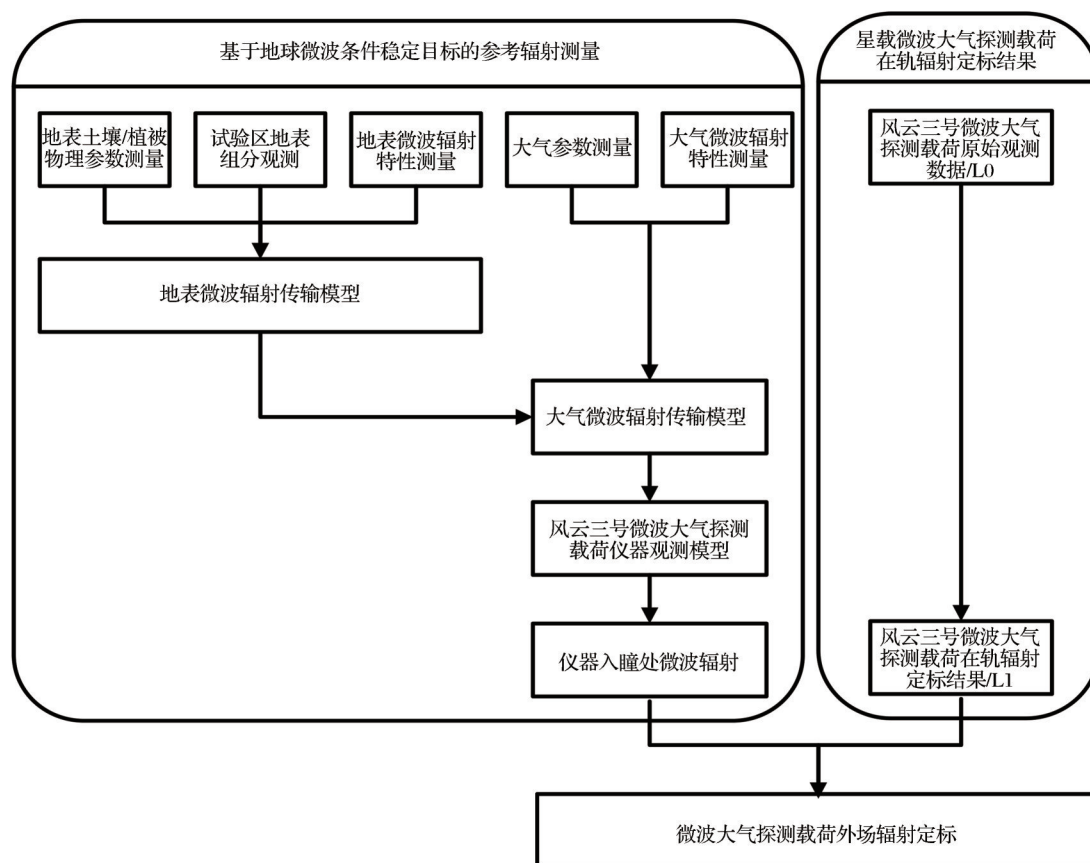


图 7 风云三号气象卫星微波大气探测载荷在轨外场定标技术框架

Fig.7 The technical framework of FengYun-3 microwave sounder post launch site calibration

2013年普洱外定标试验中,风云三号卫星过境普洱外定标场时,组织实施外场观测,准确测量地气系统地球物理参量,通过地气系统微波逐线正演辐射传输模式 MonoRTM (Monochromatic Radiative Transfer Model)<sup>[33]</sup> 进行辐射传输计算,得到 MWHS II 上行微波辐射亮温,耦合风云三号微波大气探测载荷仪器特性算子和观测算子,得到入瞳处微波辐射,与风云三号微波大气探测载荷在轨观测资料对比分析,可以检验验证在轨定标结果,并优化在轨仪器定标系统静态参数,与仪器实际观测亮

温进行对比分析<sup>[20]</sup>。

### (3) 观测—背景差辐射校准技术

星载微波辐射计观测资料的直接同化应用到天气预报的改进效果明显,直接同化观测资料需要借助正演观测算子即辐射传输模式来对仪器观测亮温进行评估和订正,由此产生了评估仪器定标精度的另一种方法:观测—背景差(O-B)差分析方法。这一方法是利用正演辐射传输模式和全球数值预报场(或分析场)大气参数对地气系统上行到仪器入瞳处的微波辐射进行模拟,得到背景亮温B,

仪器实际观测亮温为  $O$ , 对两者的偏差  $O-B$  进行统计分析从而评估仪器定标精度。

风云三号气象卫星装载的微波成像仪和微波大气探测仪, 在长期在轨业务运行中通过将载荷在轨实际观测资料( $O$ )与背景场资料( $B$ )的对比( $O-B$ )分析来监测仪器的在轨工作状况, 同时监测结果也可用于星载微波辐射计定标系统的辐射精校准和系统静态参数更新。背景场是利用其他独立观测手段获取的地气系统地球物理参数, 结合微波正演辐射传输模型计算得到。在观测—背景差辐射校准分析技术中, 当大气背景场信息来自其它空间独立观测手段, 例如 GPS 掩星大气探测数据、GROUN 观测数据、气象常规探空数据等, 都可以通过观测—背景差分析技术完成星载微波大气探测载荷的辐射校准。欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)2017 年发布的全球气候再分析数据集 ERA5 与微波辐射传输正向模型相结合, 得到的背景场微波辐射对于 50~60 GHz 的微波氧气吸收通道而言, 偏差小于 0.1 K; 对于微波大气水汽探测通道而言, 误差在 0.5~1 K<sup>[34]</sup>, 可以风云三号气象卫星微波大气探测载荷在轨辐射校准和替代定标的辐射参考。在  $O-B$  技术中正演辐射传输模型常用的有欧洲 NWP-SAF 发展的 RTTOV 和美国科学家发展的 CRTM 快速辐射传输模式。基于  $O-B$  技术, 王祥等<sup>[35]</sup>以晴空洋面区域 GPS 探测数据为大气背景场数据, 结合正演微波辐射传输模型, 分析了风云三号微波温度计亮温随角度的变化特征, 建立修正模型, 用 NCEP/GFS 背景场资料检验, 结果表明 MWTS 观测亮温的全球偏差显著减小, 标准差也有所减小, 且 MWTS 亮温资料偏差随通道和季节的变化特征也得到有效地消除。FY-3C/MWHS-II 探测数据存在角度依赖性<sup>[18, 36]</sup>, 利用  $O-B$  技术可以完成风云三号微波湿度计辐射特性的偏差分析和建模, 改进风云三号微波湿度计数据在台风路径预报数值模式中的应用效果。

在利用  $O-B$  方法对仪器观测亮温质量进行评估时, 正演辐射传输模式本身的模拟精度, 大气参数廓线的精度和仪器在轨实际观测的中心频率及频率响应函数和设计指标相比产生的特性差异等因素均会影响最终分析结果。利用  $O-B$  技术发展双偏差 DD (Double Difference Analysis) 分析,  $DD_{y_a-y_b} = (y_a - B_{t1}) - (y_b - B_{t2})$ , 可以有效抑制这些影响因素, 其中  $y_a$  和  $y_b$  是载荷  $a$  和  $b$  的观测亮温,  $B_{t1}$  和  $B_{t2}$

分别是与  $y_a$  和  $y_b$  观测时刻对应的背景场亮温, DD 分析技术也可以消除微波大气探测载荷交叉比定时资料探测时间差异带来的影响。双偏差分析结果可用于辐射定标结果检验验证、辐射定标模型优化、辐射基准传递和仪器性能在轨监测等方面。

风云三号地面业务系统已建成  $O-B$  监测分析业务系统, 为风云三号卫星微波载荷辐射定标系统优化提供了有利支撑。星载微波辐射计完成在轨星上业务辐射定标后得到可以定量应用的科学数据, 科学数据的精度是后续反演和同化应用的基础。在轨辐射校准就是对科学数据的误差特性进行分析, 校准科学数据的系统偏差; 如果星载微波辐射计定标系统在轨失效或存在缺陷, 可以通过替代定标技术重新建立在轨辐射定标链路, 保障微波辐射计遥感信息的定量应用。

风云三号气象卫星装载的微波大气探测载荷在轨辐射定标均以星上装载的标准黑体为定标基准, 尽管上星前对标准黑体进行了国际比对和基准传递, 但在轨运行过程中还需要对定标系统整体辐射定标结果进行综合分析和标准校验。交叉定标、外场定标和观测—背景差分析等技术是风云三号气象卫星微波载荷辐射校准及检验验证的主要技术手段, 这些技术同时也是风云气象卫星星载微波辐射计在轨替代定标的核心技术。

### 3.3 历史数据再定标技术

星载微波遥感信息对地球气候系统敏感, 为气候变化研究提供了有利证据。美国和欧洲科学家长期致力于星载微波气候数据集研究, 在构建微波气候数据集时, 针对载荷特点分别发展微波成像载仪气候数据集, 和微波大气探测载荷气候数据集。

多种观测资料分析表明地球表面在过去 30 a 间以 0.17 K/10 a 的变率在变暖<sup>[37]</sup>。为深刻理解地球气候系统变暖的事实, 美国 3 个科学研究小组, 利用 25 a 星载微波大气探测数据 (MSU) 分析对流层温度的微小变化趋势<sup>[23]</sup>。在 Grody 的再定标算法中通过对冷空、黑体和辐射计非线性参数的分析, 基于物理基础对长时间序列数据进行再定标, 再定标后沿纬度带平均的温度偏差不大于 0.03 K。而 Zhou 等<sup>[38]</sup>通过经验与物理相结合的方法, 再定标处理后生成 20 a 时长的 FCDR (1987~2006 年), 分析出地球大气系统对流层中部、对流层整层和平流层低层, 在 1987~2006 年间, 温度每 10 a 变率分别为 0.21、0.08 和 -0.38 K<sup>[38]</sup>; 而 Christy 对第 5 版 MSU-

AMSU数据集分析表明,卫星微波资料显示低对流层(TLT)全球平均温度异常量年标准差0.07摄氏度<sup>[22]</sup>。这些分析结果有助于人们揭示平流层与对流层间能量与物质交换和互反馈机制,也加深了人们对地球变暖事实的深刻认识。周承志在利用SNO技术实现的20 a星载微波氧气吸收通道探测数据再定标的算法中,考虑了卫星轨道漂移、非线性定标和载荷间探测结果差异的经验修正等,为我们开展国产卫星微波历史数据再定标提供了技术参考。

进入JPSS时代后,ATMS取代AMSU-A、AMSU-B和MHS,高精度的新型微波大气探测载荷ATMS为构建微波探测载荷气候数据集带来契机。ATMS继续采用交轨扫描的观测几何,首次提供了空间Nyquist采样间距,通过俯仰机动对冷空进行观测,获取在轨辐射定标静态参数,发展反射镜辐射物理模型用于ATMS辐射定标,ATMS非线性小于0.5 K,非线性修正以后,ATMS的TDR数据准确度为0.2~0.5 K,为星载微波大气探测长序列数据集提供理想的辐射基准。在欧洲已启动的微波高频大气探测数据FCDR计划中明确表示将我国风云星的微波湿度计和微波成像仪纳入FC-DR数据源。

针对风云卫星微波大气探测载荷特点,开始着手

开展长时间序列遥感卫星微波历史数据精细化再定标研究;突破卫星轨道漂移与通道衰变复合分析、全球稳定自然目标甄别与特征建模、多载荷时空与光谱匹配等关键技术;分析微波载荷定标参数变化趋势及其响应物理机理;完成基于再分析资料的卫星观测辐射模拟及验证。开展微波大气探测载荷长序列遥感数据辐射参考基准研究,微波大气探测载荷辐射响应共性模型研究,微波大气探测载荷代际间辐射传递共性模型研究,微波大气探测载荷长序列数据再定标结果仿真验证模型研究。实现长时间序列卫星历史数据再定标<sup>[39]</sup>。风云卫星微波大气探测载荷历史数据再定标技术框架见图8。

未来风云卫星将面向为气候变化研究提供国产卫星微波遥感数据方案的应用需求,建立综合考虑国际先进载荷和空间微波辐射源的辐射基准,发展国产卫星微波载荷历史数据再定标模型,为建立国产卫星微波遥感气候基础数据集奠定基础。针对气象和海洋系列卫星微波载荷再定标共性技术需求,发展基于宇宙背景和月球观测的微波辐射基准传递模型,并结合空基辐射基准交叉传递计划实现辐射基准多星多载荷间交叉传递,建立微波长序列历史数据再定标辐射参考基准。为我国开展气候和气候变化研究提供风云微波数据解决方案。

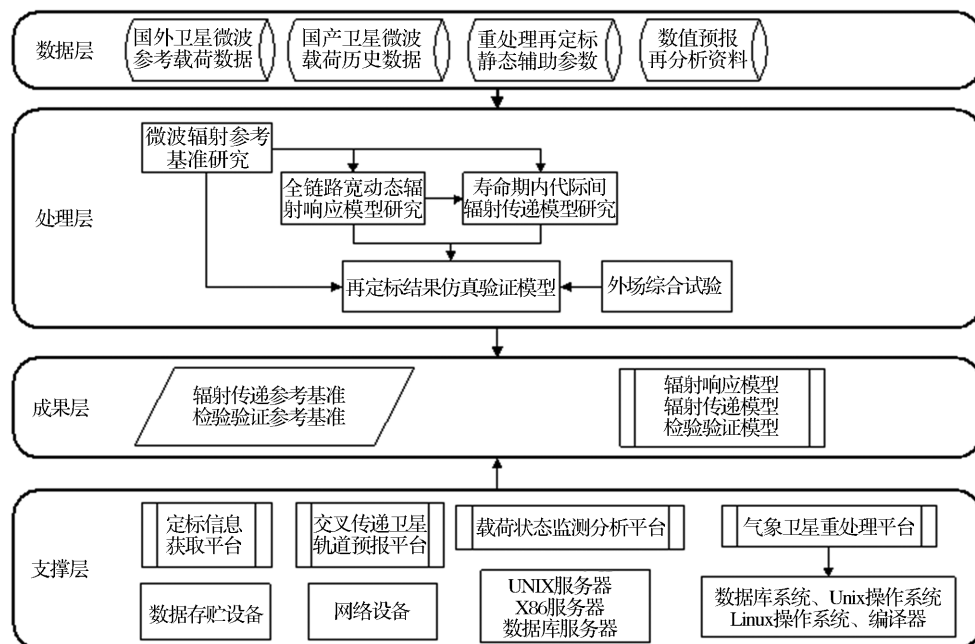


图8 风云卫星微波大气探测载荷历史数据再定标技术框架

Fig.8 The technical framework of FengYun-3 microwave sounder re-calibration



## 4 结 语

风云三号气象卫星微波大气探测载荷辐射定标,经历了诸多尝试和突破,完成了发射前真空定标试验、微波辐射参考基准传递、在轨辐射定标系统建设、在轨替代定标模型研究、微波辐射校正场外定标关键技术攻关等。这些技术成果确保了风云三号星载被动微波辐射计的在轨定量应用,其辐射资料得到国际同行的广泛认可,在ECMWF和中国气象局数值天气预报中心等业务单位业务应用。面向未来发展的应用需求风云三号气象卫星微波大气探测载荷辐射定标将面向我国气候和气候变化研究的需求进一步提升辐射定标精度,发展风云微波大气探测载荷基础气候数据集。

未来风云气象卫星将积极发展静止轨道微波大气探测技术,低轨精细谱段微波大气探测技术和太赫兹临边大气探测技术,所有这些新型探测技术的发展,都带来对辐射定标技术的挑战。为了适应新型微波载荷的发展,风云三号星载微波辐射计辐射定标技术将发展具有风云特色的天地一体化微波大气探测载荷在轨高精度辐射定标技术体系,逐步解决在轨非线性定标观测,在轨冷端辐射响应与地面真空试验的桥接,在轨微波月球定标,风云微波大气探测载荷星座体系辐射基准传递等关键技术。为天气气候研究以及数值天气预报应用提供风云微波大气探测高精度基础数据。

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Shengwei, Li Jing, Jiang Jingshan, *et al.* Design and Development of Microwave Humidity Sounder for FY-3 Meteorological Satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 199-207.[张升伟, 李靖, 姜景山, 等. 风云3号卫星微波湿度计的系统设计与研制[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 199-207.]
- [2] Lu Qifeng. Initial Evaluation and Assimilation of FY-3A Atmospheric Sounding Data in the ECMWF System[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, 41(7): 890-894.[陆其峰. 风云三号A星大气探测资料在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(7): 890-894.]
- [3] Wang Xiang, Zou Xiaolei, Weng Fuzhong, *et al.* An Assessment of the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the NCEP Numerical Weather Prediction Model[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 18-31.[王祥, 邹晓蕾, 翁富忠, 等. 用数值天气预报模式评估风云三号A星微波温度计资料的质量[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 18-31.]
- [4] Guo Yang, Lu Naimeng, Gu Songyan. Channel Selection of Millimeter/Submillimeter Wave for Temperature and Humidity Sounding[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(6): 716-723.[郭杨, 卢乃锰, 谷松岩. 毫米/亚毫米探测大气温度和湿度的通道选择[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 716-723.]
- [5] Guo Yang, Lu Naimeng, Gu Songyan. Simulation of the Radiometric Characteristics of 118 GHz and 183 GHz Channels for FY-3C New Microwave Radiometer Sounder[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(5): 481-491.[郭杨, 卢乃锰, 谷松岩. FY-3C微波湿温探测仪118 GHz和183 GHz通道辐射特性仿真分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 481-491.]
- [6] Guo Yang, Lu Naimeng, Gu Songyan, *et al.* Radiometric Characteristics of FY-3C Microwave Humidity and Temperature Sounder[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(4): 436-444.[郭杨, 卢乃锰, 谷松岩, 等. FY-3C微波湿温探测仪辐射测量特性[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(4): 436-444.]
- [7] Zhang Zuyin, Zheng Hanlin, Lin Shijie, *et al.* Calibration Method for Microwave Radiometer and Its Accuracy Analysis[J]. *Journal Huazhong University of Science and Technology*, 1984(2): 121-128.[张祖荫, 郑汉麟, 林士杰, 等. 微波辐射计的定标方法与精度分析[J]. *华中工学院学报*, 1984(2): 121-128.]
- [8] Lu Ying, Zhang Zuyin, Guo Wei, *et al.* Periodic Calibration of Spaceborne Microwave Radiometer—A Review [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 1997, 19(5): 695-700.[吕颖, 张祖荫, 郭伟. 星载微波辐射计周期定标技术的综述[J]. *电子与信息学报*, 1997, 19(5): 695-700.]
- [9] Hardy W N. Precision Temperature Reference for Microwave Radiometry (Short Papers)[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, 21(3): 149-150. doi: 10.1109/TMTT.1973.1127954.
- [10] Li Yefei. Research on the Land Thermal Vacuum Calibration Technology of the Spaceborne Microwave Radiometer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University. 2008.[李叶飞. 星载微波辐射计地面热真空定标技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.]
- [11] Li Jing, Jiang Jingshan. Reverse Radiation in Microwave Radiometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 241-244.[李靖, 姜景山. 微波辐射计的逆向辐射对定标及辐射测量的影响[J]. *遥感学报*, 1998, 2(4): 241-244.]
- [12] Wang Zhenzhan. Analysis of External Calibration Method of Satellite Microwave Radiometer[J]. *Ocean Technology*, 1996(4): 28-33.[王振占. 卫星微波辐射计外定标方法浅析[J]. *海洋技术*, 1996(4): 28-33.]
- [13] Nian Feng, Yang Yujie, Chen Yunmei, *et al.* Recent Progress on Space-borne Microwave Radiometer Pre-launch Calibration Technologies in China[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007(S1): 27-33.[年丰, 杨于杰, 陈云梅, 等. 中国星载微波辐射计地面定标技术的研究进展[J]. *宇航计测技术*, 2007(S1): 27-33.]

- [14] Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Li Jing, *et al.* The Radiometric Characteristics of Sounding Channels for FY-3A/MWHS [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21 (3): 335-342.[谷松岩, 王振占, 李靖, 等. 风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性[J]. *应用气象学报*, 2010, 21 (3): 335-342.]
- [15] Wang Zhenzhan, Zhang Shengwei, Li Jing, *et al.* Thermal/Vacuum Calibration of Microwave Humidity Sounder on FY-3B Satellite [J]. *Engineering Science*, 2013, 15(10): 33-46. [王振占, 张升伟, 李靖, 等. FY-3B卫星微波湿度计热真空定标方法和结果分析[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(10): 33-46.]
- [16] Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Li Jing, *et al.* FY-3A/MWHS Data Calibration and Validation Analysis [J]. *Engineering Science*, 2013, 15(7): 92-100.[谷松岩, 王振占, 李靖, 等. FY-3A/MWHS在轨定标结果分析[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(7): 92-100.]
- [17] Yang H, Weng F, Lü L, *et al.* The FengYun-3 Microwave Radiation Imager On-orbit Verification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4552-4560.
- [18] Guo Yang, Lu Naimeng, Qi Chengli, *et al.* Calibration and Validation of Microwave Humidity and Temperature Sounder Onboard FY-3C Satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 20-31.[郭杨, 卢乃锰, 漆成莉, 等. 风云三号C星微波湿温探测仪的定标和验证[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 20-31.]
- [19] An Dawei, Gu Songyan, Yang Zhongdong, *et al.* On-orbit Radiometric Calibration for Nonlinear of FY-3C MWTS [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(3): 317-321.[安大伟, 谷松岩, 杨忠东, 等. FY-3C微波温度计在轨辐射非线性定标新方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016(3): 317-321.]
- [20] Guo Yang. Study on Precipitation Detection and Assimilation Application for 118 GHz Onboard FengYun-3 Satellite [D]. *Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology*, 2019.[郭杨. 风云三号卫星118GHz质量控制与资料同化应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.]
- [21] Christy J R, Spencer R W, *et al.* MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(9): 1153-1170.
- [22] Grody N C, Vinnikov K Y, Goldberg M D, *et al.* Calibration of Multisatellite Observations for Climatic Studies: Microwave Sounding Unit (MSU) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D24104. doi:10.1029/2004JD005079.
- [23] Zou C Z, Goldberg M D, Cheng Z, *et al.* Recalibration of Microwave Sounding Unit for Climate Studies Using Simultaneous Nadir Overpasses [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D19114. doi:10.1029/2005JD006798.
- [24] Cao C, Weinreb M, Xu H. Predicting Simultaneous Nadir Overpasses among Polar-Orbiting Meteorological Satellites for the Intersatellite Calibration of Radiometers [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21: 537-542.
- [25] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between Special Sensor Microwave Imager/Sounder and Special Sensor Microwave Imager [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 984-995. doi: 10.1109/TGRS.2008.915752.
- [26] Gu Songyan, Guo Yang, You Ran. Radiance Transfer for FY-3A/MWHS and Space View Bias Correction [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(2): 251-257.[谷松岩, 郭杨, 游然. FY-3A/MWHS辐射传递及冷空偏差修正[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(2): 251-257.]
- [27] Gu Songyan, Wu Ronghua, You Ran. The Analysis and Correction of Lunar Intrusion to Space View of FY-3A/MWHS [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(4): 442-450.[谷松岩, 吴荣华, 游然. FY-3A/MWHS冷空测值受月球影响分析及修正[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 442-450.]
- [28] Guan Li, Lu Wenjing. Scan Correction Scheme of FY-3A Microwave Atmospheric Humidity Sounder Radiance for Data Assimilation [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(3): 400-408.[官莉, 陆文婧. 风云三号卫星微波湿度计的扫描角偏差订正[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(3): 400-408.]
- [29] Hu X Q, Liu J J, Sun L, *et al.* Characterization of CRCS Dunhuang Test Site and Vicarious Calibration Utilization for Fengyun (FY) Series Sensors [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(5): 566-582.
- [30] Hu X Q, Sun L, Liu J J, *et al.* Calibration for the Solar Reflective Bands of Medium Resolution Spectral Imager (MER-SI) onboard FY-3A [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4915-4928. doi: 10.1109/TGRS.2012.2214226.
- [31] Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Lu Naimeng, *et al.* The Principle and Data Analysis of Radiometric Calibration for Aeria-test of FY-3/MWHS [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(6): 1205-1211.[谷松岩, 王振占, 卢乃锰, 等. 风云三号微波湿度计航空校飞辐射定标原理及数据分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(6): 1205-1211.]
- [32] Xiao Zhihui, Zhang Zuying, Guo Wei. A Review: The Calibration of Ground-based, Airborne and Satellite-borne Microwave Radiometers [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2000, 15(2): 113-120.[肖志辉, 张祖荫, 郭伟. 地基、空基、星基微波辐射计定标技术概览[J]. *遥感技术与应用*, 2000, 15(2): 113-120.]
- [33] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al.* Atmospheric Radiative Transfer Modeling: A Summary of the AER Codes [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 91(2): 233-244.
- [34] Carminati F, Migliorini S, Ingleby B, *et al.* Using Reference Radiosondes to Characterize NWP Model Uncertainty for Improved Satellite Calibration and Validation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(1): 83-106.

- [35] Wang Xiang, Ren Yifang, Wu Bin. Absolute Calibration of MWTS Sounding Channels Using GPS RO Data[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(1): 81-89.[王祥, 任义方, 吴彬. 用GPS资料对风云三号微波温度计资料进行绝对校准[J]. 大气科学学报, 2017, 40(1): 81-89.]
- [36] Weng F, Zou X, Wang X, *et al.* Introduction to Suomi National Polar-Orbiting Partnership Advanced Technology Microwave Sounder for Numerical Weather Prediction and Tropical Cyclone Applications[J]. Journal of Geophysical Research. 2012, 117:D19112. doi: 10.1029/2012JD018144.
- [37] Solomon S, Manning M, Marquis M, *et al.* Climate Change 2007-the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [38] Zhou C Z, Mei G, M. D. Error Structure and Atmospheric Temperature Trends in Observations from the Microwave Sounding Unit[J]. Journal of Climate, 2009, 22(7): 1661-1681.
- [39] Li Jiaoyang, Wang Zhenzhan, Gu Songyan, *et al.* Common Re-calibration Technology for Spaceborne Microwave Atmospheric Humidity Sounder [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1212-1220.[李娇阳, 王振占, 谷松岩, 等. 星载微波大气湿度探测仪再定标共性技术分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1212-1220.]

## Radiometric Calibration Technology of Microwave Atmospheric Sounders of FY-3 Satellites

Gu Songyan, Guo Yang, Dou Fangli, Wu Qiong, Lu Naimang

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** FY-3 meteorological satellite is the second generation of polar orbit operational meteorological satellite in China. It has global, all-weather and multispectral detection capabilities, and is loaded with two microwave atmospheric sounding payloads of MWTS and MWHS. Since the first satellite launched in 2008, FY-3 microwave atmospheric sounders have played an active role in disaster prevention and numerical weather prediction. The radiometric calibration of FY-3 meteorological satellite is a data processing process of obtaining the target brightness temperature from the original observation data, which includes four technical links: pre-launch calibration, on orbit calibration, comprehensive radiometric calibration and historical data re-calibration. Accurate radiometric calibration is the basis of quantitative application of satellite passive microwave radiometer remote sensing data. This paper summarizes the comprehensive radiometric calibration technology of the microwave atmospheric sounders of FY-3 meteorological satellite, expounds the basic principle and technical status of the comprehensive radiometric calibration technology of the microwave atmospheric sounding load of FY-3 meteorological satellite, and looks forward to the future development of the comprehensive radiometric calibration technology of the microwave atmospheric sounding load of FY-3 meteorological satellite.

**Key words:** Microwave atmospheric sounders of FY-3 meteorological satellite; Comprehensive radiation calibration; Cross calibration; Site calibration